

## Дискусії

УДК 621.3

В.Я. Кутковецький

## ФІЗИЧНА ОСНОВА ЗАКОНУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

*Твердження про залежність ЕРС на макрорівні від зміни магнітного потоку контуру у часі невірно відображає фізичне явище електромагнітної індукції за Фарадеєм, тому що ЕРС може наводитись, якщо магнітний потік контуру не змінюється. Зміна магнітного потоку контуру при наведенні ЕРС виникає лише як наслідок перетинання провідником магнітних силових ліній і є винятком, який стосується лише певних класів електричних машин. Бібл. 11, рис. 11.*

**Ключові слова:** закон електромагнітної індукції, Фарадей, Максвелл, явище.

*Утверждение про зависимость ЭДС на макроуровне от изменения магнитного потока контура во времени неверно отображает физическое явление электромагнитной индукции по Фарадею, т. к. ЭДС может наводиться, если магнитный поток контура не изменяется. Изменение магнитного потока контура при наведении ЭДС возникает только как следствие пересечения проводником магнитных силовых линий и является исключением, которое касается только определенных классов электрических машин. Библ. 11, рис. 11.*

**Ключевые слова:** закон электромагнитной индукции, Фарадей, Максвелл, явление.

**Постановка проблеми.** Розглянемо математичні моделі закону електромагнітної індукції на макрорівні у вигляді формулювання Максвелла [8]

$$e = -P \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

де  $e$  – ЕРС;  $t$  – час;  $d\Phi$  – зміна магнітного потоку контур, що викликана будь-якою причиною;  $P$  – перемікаюча функція, яка приймає значення "1" при дотриманні умов Фарадея та "0" у іншому разі [8];

та формулювання Фарадея (воно часто тлумачиться з точки зору зміни магнітного потоку контур)

$$e = PBL_{\Pi}V, \quad (2)$$

де  $B$  – магнітна індукція;  $L_{\Pi}$  – довжина провідника;  $V$  – модуль швидкості руху провідника у напрямку, перпендикулярному довжині провідника, який урахує перетинання провідником безперервних магнітних силових ліній.

Фізичну основу закону електромагнітної індукції на макрорівні визначив Фарадей: ЕРС дорівнює швидкості перетинання провідником магнітних силових ліній.

Математично тотожні і експериментально підтверджені моделі (1) та (2) є вірними, корисними і необхідними при аналізі електричних машин. Але сучасне тлумачення явища електромагнітної індукції згідно формул (1) та (2) в основному пов'язує фізику створення ЕРС на макрорівні із зміню магнітного потоку контуру [1-6, 8, 10, 11].

Між тим досліді показують, що без урахування умов Фарадея формула (1) у вигляді  $e = -d\Phi/dt$ :

1. При  $d\Phi \neq 0$  та  $dt \neq 0$  не підтверджується експериментально, бо  $e = 0$  [10].

2. В уніполярних генераторах при  $e = E = \text{const}$ , (звідки  $\Phi = -Et$ ) у дійсності спостерігається  $\Phi = \text{const}$ , [8], що позбавляє рівняння  $e = -d\Phi/dt = E = \text{const}$ , не лише фізичного, але й математичного сенсу внаслідок "некоректності" математичних перетворень.

В результаті виникають питання: наскільки формули (1) та (2) вірно тлумачаться при поясненні фізики явища? Чи є необхідність протиставлення фізичних процесів зміни магнітного потоку контуру та перетинання провідником магнітних силових ліній?

**Мета.** Метою статті є доведення того, що при тлумаченні фізики явища електромагнітної індукції треба використовувати визначення Фарадея. Зміна магнітного потоку контуру за формулою (1) при наведенні ЕРС спостерігається не в усіх експериментах; в дослідях, де ця зміна магнітного потоку контуру все ж підтверджена, вона є наслідком перетинання провідником магнітних силових ліній, тобто не є першопричиною наведення ЕРС.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Фарадей у 1831 р. сформулював закон електромагнітної індукції у вигляді твердження стосовно замкнутого контуру зі струмом: "Заряд  $\Delta q$ , який пройшов по замкнутому ланцюгу, є пропорційним зміні магнітного поля  $\Delta\Phi$  і є зворотно пропорційним опорі ланцюга  $R$ ", тобто

$$\Delta q = -\Delta\Phi/R. \quad (3)$$

Уніполярний генератор (рис. 1) був створений Фарадеєм у 1831 р. для демонстрації наведення ЕРС і складався з постійного магніту 1 та мідного диску 2, що обертався між полюсами N та S магніту 1. ЕРС знімалась щітками і вимірювалась гальванометром G.

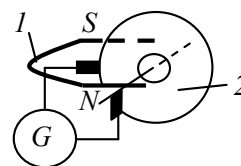


Рис. 1. Генератор Фарадея

Пізніше Фарадей ввів поняття магнітного потоку  $\Phi$  та його зміни  $\Delta\Phi$ , створив "мову" магнітних силових ліній і прийшов до висновку, що вирішальною умовою виникнення індукційних струмів є перетинання провідником магнітних силових ліній. До цього твердження є більш наближеною формула (2).

В.Ф. Миткевич [10, с. 83-86] розрізняв закон Фарадея

$$e = -\frac{d\Phi^*}{dt}, \quad (4)$$

де  $\Phi^*$  – кількість пересічених провідниками контур магнітних силових ліній,

© В.Я. Кутковецький

і закон Максвелла у вигляді  $e = -d\Phi/dt$ . Він стверджував, що формула (4) ближче до суті фізичного процесу і є стабільно універсальною у порівнянні з формулюванням Максвелла  $e = -d\Phi/dt$ .

Для доведення необхідності використання формули (4) замість формули  $e = -d\Phi/dt$  В.Ф. Миткевич описав три експерименти, у яких не дотримувались умови Фарадея щодо перетину провідником магнітних силових ліній, внаслідок чого ЕРС контуру дорівнювала нулю при зміні його магнітного потоку [10]. Для скорочення огляду, з наведених ним трьох дослідів розглянемо лише один (рис. 2). На рис. 2 по первинній обмотці трансформатора  $w_1$  протікає постійний струм і створює у магнітопроводі постійний магнітний потік  $\Phi$ , а замкнений на гальванометр  $G$  один виток вторинної обмотки  $w_2 = 1$  при ковзанні по електропровідному "кільцю" змінює свій магнітний потік з нуля на  $\Phi$  [10, с. 83]. Але при цьому за законом  $e = -d\Phi/dt$  ЕРС не створюється із-за відсутності процесу перетинання провідником магнітних силових ліній.

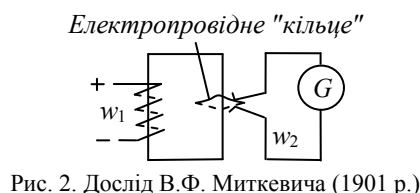


Рис. 2. Дослід В.Ф. Миткевича (1901 р.)

В.Ф. Миткевич також стверджував, що в уніполярних машинах існує захована комутація [10]. Але проведений пізніше дослід на барабанному уніполярному генераторі (рис. 3) довів, що "захованої комутації" не існує, а у замкненому контурі можна нескінченно довго наводити постійну ЕРС без зростання модуля магнітного потоку контуру до "нескінченності" [7].

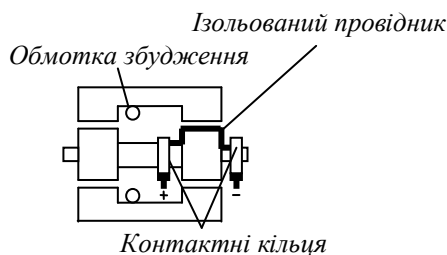


Рис. 3. Уніполярний генератор

Для аналізу процесу створення ЕРС є зручними уніполярні генератори періодичних прямокутних імпульсів. Схема обмотки уніполярного генератора прямокутних імпульсів постійного струму наведена на рис. 4,а [9]. Початки та кінці з'єднаних паралельно провідників 1 на одному полюсі циліндричного ротора уніполярного генератора барабанного типу увімкнені до двох контактних кілець 2, а уніполярний полюс статора 3 є зубчастим і вміщує однакові одиниці виділені сірим фоном полюси, які рівномірно розміщені по колу статора.

Між циліндричним ротором та зубцями полюсами статора передбачений повітряний проміжок, який у ділянці між полюсами статора різко зростає. У кожному провіднику 1 за формулою (2) гене-

руються однакові прямокутні імпульси ЕРС, які спадають майже до нуля при проходженні провідниками ділянки між полюсами статора з малим значенням магнітної індукції (рис. 4,б).

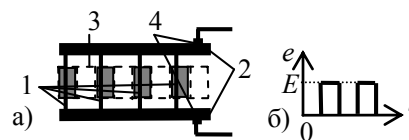


Рис. 4. Схема обмотки генератора уніполярних імпульсів

Результати повторення дослідів Фарадея рис. 1 з урахуванням схеми рис. 3 у дисковому варіанті (рис. 5) наведені в роботі [8]. Уніполярний генератор (рис. 5,а) складається з постійного магніту, між полюсами якого N та S обертається диск 1 з односторонньої друкованої плати з фольгованого склотекстоліту товщиною 1,5 мм, на якій витравлені верхня доріжка для щітки 2, активний провідник 3 (у ньому наводиться ЕРС) та нижня доріжка для щітки 4.

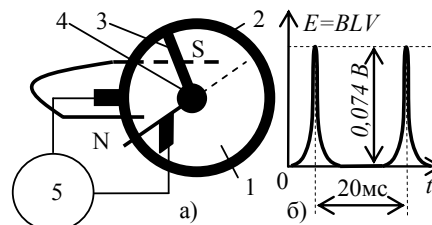


Рис. 5. Принцип роботи уніполярного імпульсного генератора постійного струму: а — схема виконання дослідів; б — форма отриманих осцилограм

За допомогою щіток ЕРС активного провідника 3 вимірюється осцилографом 5.

Магнітна система генератора створює у робочому повітряному проміжку машини магнітний полюс шириною 4 мм та довжиною 50 мм вздовж радіусу ротора. Двигун, який обертає диск 1, не показаний. При обертанні диска 1 у провіднику 3 (рис. 5,а) наводиться позитивно спрямовані імпульси постійної ЕРС з амплітудою 0,074 В. Форма імпульсів ЕРС наведена на рис. 5,б.

Досліди показали, що додання до схеми рис. 5,а нового магніту, зсунутого на деякий кут відносно першого магніту і з протилежним напрямком магнітної індукції, призводить до отримання на виході ЕРС зі змінними напрямками імпульсів.

З дослідних даних генератора рис. 5 випливає:

1. Підтверджується висновок, наведений в роботі [7], що у замкненому контурі можна нескінченно довго наводити імпульси ЕРС постійного напрямку без зростання модуля магнітного потоку контуру до "нескінченності" (відомий "парадокс" уніполярного генератора).

2. Наведення ЕРС в контурі рис. 5,а відбувається, лише коли ізолюваний провідник ротору пересікає магнітне поле статора. В усіх інших положеннях провідника зовні дії магнітного потоку статора ЕРС не наводиться. Напрямок ЕРС залежить від напрямку магнітної індукції полюса постійного магніту.

В роботі [8] описані багатопольосні імпульсні уніполярні генератори постійного та змінного струму дискового (рис. 6) та барабанного (рис. 7) типів.

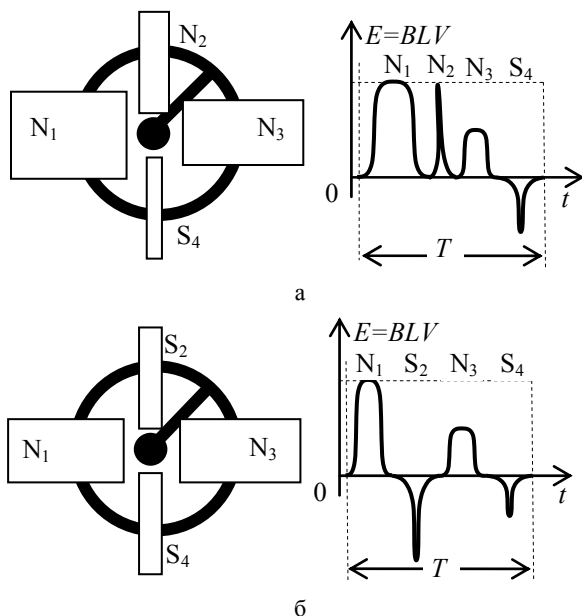


Рис. 6. Конструкції багатопольного уніполярного генератора дискового типу

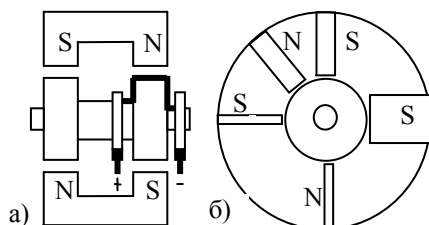


Рис. 7. Багатопольний уніполярний генератор барабанного типу: а – переріз вздовж осі; б – поперечний переріз

Ці машини мають довільне розміщення та довільну форму полюсів N та S постійних магнітів та один ізолюваний активний провідник на роторі. За один період обертання ротору машина може генерувати довільну послідовність імпульсів ЕРС заданої довільної форми та спрямування.

На рис. 6 показані два приклади можливих схем багатопольних уніполярних генераторів дискового типу та можливі вихідні імпульси ЕРС, зверху яких наведені позначення відповідних полюсів, помічених літерами  $N_1, N_2, N_3, S_2, S_4$  [8].

В роботі [8] запропоновано використовувати закон електромагнітної індукції у формулюванні Максвелла для визначення ЕРС у вигляді

$$e = -P \cdot d\Phi / dt, \quad (5)$$

де  $d\Phi$  – зміна магнітного потоку контуру;  $dt$  – крок у часі;  $P$  – перемикаюча функція, яка має значення "1" у випадку дотримання умов Фарадея і дорівнює "0" у іншому випадку,

а систему рівнянь Максвелла – у вигляді

$$\text{rot}E = P\partial B / \partial t; \text{rot}H = j + \partial D / \partial t; \text{div}D = \rho; \text{div}B = 0, \quad (6)$$

де  $E$  – напруженість електричного поля;  $B$  – магнітна індукція;  $H$  – напруженість магнітного поля;  $j$  – щільність електричного струму, викликаного рухом зарядів;  $D$  – електрична індукція;  $\rho$  – щільність електричного заряду.

**Виклад основного матеріалу.** При розгляді закону електромагнітної індукції Фарадея за формулами (1) та (2) потрібно розрізнати:

- кількість пересічених провідником магнітних силових ліній за одиницю часу (за Фарадеєм);
- інтегровану за деякий час загальну кількість перетнутих провідником магнітних силових ліній. Наприклад, для всіх безперервно працюючих у часі електричних машин (синхронних, асинхронних, постійного струму з колектором, уніполярних) у природі не існуюча інтегрована за деякий час кількість перетнутих провідником магнітних силових ліній (магнітний потік) наближується до "нескінченності" (напрямок магнітних силових ліній не розглядається);
- кількість магнітних силових ліній контуру (магнітний потік контуру).

Сучасне тлумачення математичних моделей (1) та (2) має наступні відміни у порівнянні з явищем електромагнітної індукції, описаним Фарадеєм:

1. Першу різницю між ними можна визначити словом – "контур": тлумачення формул (1) та (2) в основному спрямовані на розгляд зміни магнітного потоку контуру. Разом з тим експерименти Миткевича [10] та проведені досліді на уніполярних машинах [7, 8] показують, що у загальному випадку наведення ЕРС не залежить від зміни магнітного потоку контуру.

Хоча введення поняття впливу "зміни магнітного потоку контуру" на ЕРС є необхідним і зручним для аналізу електричних машин, але стосовно фізики явища електромагнітної індукції воно повинне тлумачитись як виняток, який фізично обґрунтований лише для ряду електричних машин, але не стосується уніполярних машин і не підтверджується деякими іншими експериментами [10]. Між тим закон не повинен мати винятків та парадоксів. Тому у загальному випадку при поясненні явища електромагнітної індукції Фарадея в основному потрібно застосовувати поняття "провідника".

Ускладнень з аналізом роботи машин синхронних, асинхронних та машин постійного струму з колектором за формулою (1) не виникає, бо для них у кожний даний момент часу похідна по потоку  $e = -d\Phi/dt$  дорівнює кількості перетнутих провідником магнітних силових ліній за одиницю часу, а магнітний потік контуру дорівнює інтегралу магнітної індукції по площині контуру.

Проблема виникає при аналізі уніполярних машин звичайної конструкції, у яких магнітний потік контуру є постійним ( $\Phi = \text{const}, d\Phi \approx 0$ ), що позбуває не лише фізичного, але й математичного сенсу поняття потоку контуру у формулі (1).

2. Друга різниця між визначенням Фарадея та формулами (1) і (2) полягає у дотриманні лінгвістичної вимоги Фарадея – "перетинання провідником магнітних силових ліній".

У роботі [8] звернуто увагу на те, що магнітний потік уніполярного генератора не може перевищувати номінального значення, а його "нескінченне зростання у часі" пояснюється тим, що формула Максвелла (1) моделює роботу реально не існуючої електричної машини з нескінченно великим індуктором та рівним нескінченності магнітним потоком.

Разом з тим у роботі [8] залишились поза увагою те, що дослідні дані не підтверджують прив'язку

взаємопов'язаних формул (1) та (2) до зміни магнітного потоку контуру:

1. З експерименту рис. 2 випливає, що зміна магнітного потоку контуру не викликає виникнення ЕРС.

2. З експерименту рис. 3 випливає, що при постійному магнітному потоці контуру в ньому можна "нескінченно" довго наводити ЕРС. Якщо роботу будь-якої звичайної уніполярної машини дискового чи барабанного типу описати рівнянням  $e = -d\Phi/dt = E = \text{const}$ , то з математичної точки зору магнітний потік повинен лінійно зростати у часі до "нескінченності" за формулою  $\Phi = -E \cdot t$ . У дійсності експерименти це не підтверджують і можна вважати, що  $\Phi \approx \text{const}$ .

3. З експериментальних даних по ЕРС рис. 4,б (або рис. 8,а) та формули (1) випливає, що магнітний потік замкнутого контуру повинен безупинно збільшуватися до "нескінченності" згідно рис. 8,б, що є парадоксом: воно експериментами не підтверджується і таке нарощування теоретично неможливе, бо означає зростання до "нескінченності" накопиченої у магнітному полі електромагнітної енергії.

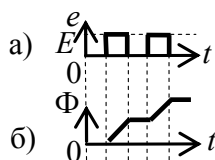


Рис. 8. Зміна у часі ЕРС та магнітного потоку генератора (рис. 4)

У звичайному уніполярному генераторі з рівномірним повітряним проміжком та конструкцією ротора, аналогічною рис. 4, у контурі з двох однакових паралельно увімкнених провідників наводяться рівні і зустрічно спрямовані ЕРС. Магнітний потік контуру з цих двох провідників, не змінюється (скільки увійшло у контур магнітних силових ліній – стільки ж й вийшло), і ЕРС контуру дорівнює нулю; а між тим явище електромагнітної індукції для двох провідників все ж спостерігається. І одночасно для аналогічного контуру з цих же двох провідників за даними рис. 2 можна збільшувати магнітний потік, а ЕРС контуру і провідників буде дорівнювати нулю.

Наявність парадоксів (невідповідності закону експериментам) прямо вказує на те, що математична модель та відповідне їй твердження не є законом. Разом з тим самі парадокси є захищеною підказкою щодо розв'язання проблеми.

Щоб визначити вплив на ЕРС зміни величини магнітного потоку контуру, розглянемо звичайний дисковий уніполярний генератор рис. 9,а, де  $B$  вказує напрямом магнітних силових ліній стосовно дискового електропровідного ротора 1. З'єднані з гальванометром  $G$  провідники можна розмістити таким чином, щоб магнітний потік вимірювального контуру, який створюється лише робочим магнітним потоком статора, був мінімальним (з використанням положення провідника  $A$ , показаного безперервними лініями). В результаті при мінімальному і постійному за величиною магнітному потоці контуру ми маємо стабільне у часі за період  $T$  наведення ЕРС у контурі (рис. 9,б).

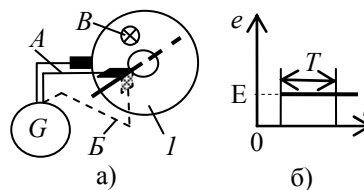


Рис. 9. Дисковий уніполярний генератор

Якщо змінити положення провідника  $A$  на положення  $B$ , то контур гальванометра  $G$  охоплює більшу частку робочого магнітного потоку, а величина ЕРС не змінюється у часі. Величина ЕРС також не змінюється у часі, якщо змінити знак магнітного потоку контуру переміщенням провідника  $A$  не проти руху стрілки годинника (як це показано на рис. 9,а), а за рухом стрілки годинника.

В результаті можна зробити висновок, що в уніполярному генераторі в режимі холостого ходу ми спостерігаємо стабільний у часі магнітний потік вимірювального контуру, який може змінюватись експериментатором по знаку та величині (від нуля до номінального значення) без впливу на величину ЕРС.

Цей висновок прямо суперечить математичній моделі  $e = -d\Phi/dt$ : ЕРС у контурі існує, а магнітний потік контуру не змінюється.

Слід звернути увагу на те, що це також "суперечить і нашим математичним поняттям", пов'язаним з тим, що магнітний потік, як інтегральна величина по часу, не може не змінюватись при наведенні ЕРС згідно  $e = -d\Phi/dt$ , а тим більше – стабільно дорівнювати нулю у часі, що спостерігається у положенні провідника  $A$  за рис. 9,а. Для усунення цього "математичного парадоксу" слід згадати про існування "математичних формул з лінгвістичними умовами", прикладом яких є вирази  $e = -d\Phi/dt$  та (4): формально вони "наче однакові", але формула (4) супроводжується умовою Фарадея. Тому у питаннях наведення ЕРС потрібно мати на увазі всі без виключення умови Фарадея стосовно явища електромагнітної індукції. З формули  $e = -d\Phi/dt$  випливає, що обов'язковою причиною появи ЕРС є зміна магнітного потоку контуру, а у формулі (4) "лінгвістичний додаток" вказує, що перетин провідником магнітних силових ліній є першопричиною і виникнення ЕРС і зміни (і то не в усіх дослідах) магнітного потоку контуру. Експерименти нам підказують: у деяких випадках наведення ЕРС за рахунок перетину провідником магнітних силових ліній супроводжується зміною магнітного потоку контуру (в машинах змінного струму), а у деяких випадках – ні (рис. 9,а).

На наш погляд, найліпшим чином це можна урахувати введенням перемикаючої функції  $P$  у рівняння Максвелла за формулами (1), (5) та (6) та у формулу Фарадея (2).

Картина, аналогічна рис. 9, також спостерігається стосовно звичайного уніполярного генератора барабанного типу (рис. 10).

На рис. 10,а позначені: 1 – виділений сірим фоном один масивний феромагнітний уніполярний полюс ротора уніполярного генератора барабанного типу у розгорнутому вигляді; 2 – щітки ковзання,

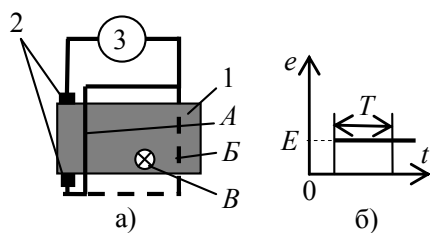


Рис. 10. Схема обмотки уніполярного генератора

напруга на яких вимірюється осцилографом 3;  $B$  – спрямованість магнітних силових ліній робочого магнітного потоку;  $A$  та  $B$  – одне з можливих положень вимірювального провідника осцилографа 3. Із рис. 10,а випливає, що якщо вимірювальний провідник знаходиться у положенні  $A$ , то магнітний потік контуру вимірювання  $\Phi \approx 0 = \text{const}$ ; переміщення його у положення  $B$  збільшує магнітний потік контуру, але цей потік не змінюється у часі у процесі роботи. Стосовно схеми рис. 10 можна стверджувати, що магнітний потік контуру при роботі не змінюється, а ЕРС не дорівнює нулю. Це можна пояснити лише за твердженням Фарадея.

У цьому випадку контур рис. 10,а також демонструє відомий "парадокс": магнітний потік цього контуру за формулою Максвелла  $e = -d\Phi/dt$  повинен зростати до нескінченності. Використання математичних моделей (5) та (6) вилучає цей "парадокс" і розв'язує математичні проблеми.

Розглянемо величину магнітного потоку контуру на одному полюсі ротора "барабанного" уніполярного генератора імпульсів ЕРС однакового спрямування (рис. 11,а, аналогічний рис. 7), на якому позначені: 1 – один ізолюваний провідник на циліндричному роторі, який з'єднаний з двома електропровідними кільцями 2, напруга з яких знімається за допомогою щіток ковзання 3 і вимірюється осцилографом 5. На статорі розміщені два полюси 4 однакової полярності  $N$ .

У цьому випадку можна розмістити провідники, з'єднані з осцилографом 5, у положення  $A$  (рис. 11,а), що дозволяє отримати показані на рис. 11,б однополярні імпульси ЕРС. Але переміщення провідника осцилографа з положення  $A$  в показане пунктиром положення  $B$  не змінює умови пересічення рухомим провідником 1 магнітних силових ліній, хоча магнітний потік контуру періодично й змінюється у часі.

Тобто в одному й тому ж приладі форма ЕРС не змінюється при  $\Phi = 0 = \text{const}$ , та при  $\Phi = \text{var}$ . Це доводить справедливість твердження Фарадея.

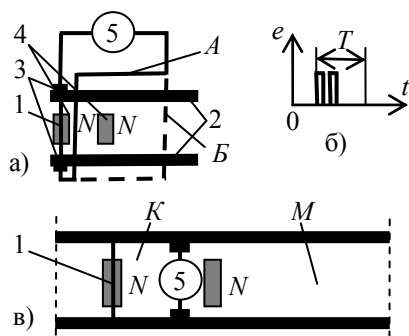


Рис. 11. Схема обмотки генератора уніполярних імпульсів

Згідно рис. 11,в осцилограф 5 з власними провідниками розділяє магнітний потік одного циліндричного полюсу ротору на дві частки, які позначимо літерами  $K$  та  $M$  (їх розміри змінюються при обертанні ротора). З рис. 11,в бачимо, що переміщення провідника 1 настільки ж збільшує магнітний потік контуру  $K$ , наскільки зменшує магнітний потік контуру  $M$  і навпаки. Тому ЕРС обох контурів спрямовані у різні сторони і співпадають по напрямку і по величині на осцилографі 5.

З рис. 11,в ми отримуємо три взаємно пов'язані твердження: ЕРС у провіднику виникає при збільшенні магнітного потоку контуру  $K$ , при тототжому зменшенні магнітного потоку контуру  $M$ , при незмінності підсумку магнітних полів контурів  $K$  та  $M$  (незмінності робочого магнітного поля машини у режимі холостого ходу). Таким чином, у даному випадку ми повинні стверджувати, що причиною виникнення ЕРС у провіднику 1 рис. 11,в є зміна магнітних потоків двох контурів (збільшення магнітного потоку одного контуру повинне одночасно супроводжуватись зменшенням магнітного потоку другого контуру) при незмінності магнітного потоку контуру, який охоплює обидва вказані контури. Ці твердження цілком узгоджуються з формулою Максвелла  $e = -d\Phi/dt$  і наведені лише для демонстрації деякого ускладнення аналізу, яке не виникає у цьому питанні з точки зору вимог Фарадея.

Хоча тут й отриманий зв'язок між зміною магнітного поля контурів та перетинанням провідником магнітних силових ліній, але ця зміна магнітних потоків контурів  $K$  та  $M$  існує як наслідок перетинання провідником магнітних силових ліній. Тобто єдине вірне фізичне пояснення явища електромагнітної індукції належить Фарадею: ЕРС дорівнює швидкості перетину провідником безперервних магнітних силових ліній і, відповідно, не залежить від зміни величини магнітного потоку контуру у часі за формулою  $e = -d\Phi/dt$ .

Цей процес можна розглянути також з точки зору зміни топології схеми: два контури об'єднуються у один контур з тим, щоб у наступний момент розділитись на два контури. В момент об'єднання двох контурів магнітний потік вимірювального контуру з осцилографом дорівнює мінімальному ("нульовому") значенню при максимальному магнітному потоці зовнішнього контуру, який після цього розділяється на два контури: в першому магнітний потік зменшується, а у другому – на стільки ж зростає. Відомо, що в момент зміни топології електромагнітна енергія може передаватись між конурами без перенапруг.

Якщо ж у рис. 11 використати магнітні полюси протилежної полярності  $N$  та  $S$ , то знову експериментально не підтверджується залежність ЕРС від величини магнітного поля контуру згідно  $e = -d\Phi/dt$ .

Дійсно, за формулою  $e = -d\Phi/dt$  перший позитивний імпульс ЕРС означає збільшення магнітного потоку контуру, який потім залишається незмінним до другого негативного імпульсу ЕРС, що визначає зменшення магнітного потоку контуру на другому імпульсі до нуля. У цьому випадку виникає парадокс другого порядку: якщо ми визнаємо зростання магнітного потоку

контур на першому імпульсі ЕРС для рис. 11, то ми повинні визнати зростання магнітного потоку контуру до нескінченності за рис. 8,б. Ми не можемо стверджувати наче очевидну річ – зростання магнітного поля контуру на позитивному імпульсі ЕРС, бо існують два контури: в одному магнітне поле збільшується, а у іншому на стільки ж зменшується. А у цілому магнітний потік одного полюсу ротора не змінюється.

Вихід з цього тупика належить Фарадею: зміна магнітного потоку контуру у часі не впливає на ЕРС, головна фізична причина наведення ЕРС – це швидкість перетину провідником безперервних магнітних силових ліній.

З рис. 9 – 11 випливає, що в уніполярних машинах ЕРС контуру не залежить від зміни величини магнітного поля контуру і разом з тим процес створення ЕРС точно відповідає закону Фарадея.

Зміна магнітного потоку контуру у часі за формулою  $e = -d\Phi/dt$  та кількість перетнутих провідником магнітних силових ліній за одиницю часу – це не тотожні поняття.

З формул (1) та (2) випливає:

1. У формули (1) та (2) не входять перетнуті у минулому магнітні силові лінії. Це означає, що магнітний потік контуру не впливає на наведення в ньому ЕРС. Тому пояснення фізики явища повинне стосуватись не зміни у часі магнітного потоку контуру, а за Фарадеєм – швидкості перетинання провідником магнітних силових ліній.

2. Розрахунок ЕРС уніполярних машин виконується за формулою (2), при розгляді провідника, що перетинає магнітні силові лінії і при незмінній величині магнітного потоку контуру. Ця математична несумісність з формулою (1) узгоджується лише за рахунок введення в (1) перемикаючої функції.

3. При проектуванні електричних машин, розрахунок ЕРС контуру, котушки і фази, а також обмоткового коефіцієнта (з урахуванням укорочення кроку котушки, скосу провідників, розподілу котушок) для електричних машин постійного струму з колектором та машин змінного струму виконується на базі розгляду ЕРС активних провідників, які перетинають магнітні силові лінії. У розрахункових формулах інтегральний магнітний потік контуру впливає потім, при узагальненні аналізу.

4. Без урахування скінченності розмірів індуктора та напрямку магнітних силових ліній за рівняннями (1) та (2) провідники контуру при необмеженій у часі роботі електричної машини перетинають "нескінченну" кількість магнітних силових ліній [8].

Таким чином, фізичною основою створення ЕРС є процес перетинання провідником магнітних силових ліній за Фарадеєм. Тобто формула Максвелла (1) у сучасному тлумаченні оперує не з фізичною причиною виникнення ЕРС, а з її наслідками, які є вірними лише для визначених типів електричних машин. У зв'язку з цим при фізичному тлумаченні математичних моделей законів електромагнітної індукції (1) та (2) потрібно ураховувати вимоги Фарадея.

#### Висновки.

1. Фізичною основою закону електромагнітної індукції є твердження Фарадея, яке цілком розділяв

і Максвелл: ЕРС дорівнює швидкості перетинання провідником магнітних силових ліній. Саме це й відображає формула (1). В формулі (1)  $d\Phi$  слід розглядати як кількість перетнутих провідником магнітних силових ліній за час  $dt$ , а не як зміну магнітного потоку контуру, бо у загальному випадку магнітний потік контуру може й не змінюватись.

2. При розгляді закону електромагнітної індукції Фарадея у вигляді математичної моделі  $e = -P \cdot d\Phi/dt$  потрібно розрізняти:

- кількість перетнутих провідником контуру магнітних силових ліній за одиницю часу (за Фарадеєм);
- інтегральну кількість пересічених провідником магнітних силових ліній при безперервній роботі машини (яка може збільшуватись у часі до "нескінченності");
- кількість магнітних силових ліній контуру.

3. Наведення ЕРС обов'язково супроводжується перетином провідником безперервних магнітних силових ліній, який не обов'язково змінює магнітний потік контуру (експерименти рис. 3, рис. 9, рис. 10), в той час як зміна у часі магнітного потоку контуру без перетину провідником магнітних силових ліній не викликає появи ЕРС (рис. 2).

4. Слід звернути увагу й на те, що у першому уніполярному генераторі (демонстраційному "диску Фарадея", рис. 1) магнітний потік контуру не змінюється. Тому, на наш погляд, бажано, щоб найбільш розповсюджена у фаховій літературі математична модель (1) поступилась своїм місцем формулі (2), яка більш точно передає фізичну сутність закону електромагнітної індукції, запропонованого Фарадеєм. Те, що для синхронних та асинхронних машин і колекторних машин постійного струму значення  $d\Phi$  дорівнює зміні магнітного потоку контуру є вірним, але є лише наслідком перетинання провідниками магнітних силових ліній і винытком у загальному випадку. Фізичною причиною виникнення ЕРС є перетинання провідником магнітних силових ліній – за твердженням Фарадея.

5. Урахування умов Фарадея (наприклад, у формі виразів (1), (2), (5), (6) з використанням перемикаючих функцій  $P$ , чи у вигляді лінгвістичних обмежень) виключає "парадокс" і дозволяє:

- отримати в уніполярних генераторах математично невірний результат  $\Phi = 0 = \text{const}$  при наведенні постійної ЕРС  $e = -P \cdot d\Phi/dt = E = \text{const}$ ,  $P = 1$ ;
- вилучити зростання до "нескінченності" магнітного потоку контуру в уніполярних машинах при ЕРС  $e = -P \cdot d\Phi/dt = E = \text{const}$ ,  $P = 1$ , бо це зростання у формі  $\Phi = -Et$  слід розглядати як результат безперервної роботи машини у часі при "нескінченній" величині індуктора;

- застосувати у математичній залежності (1) зміну магнітного потоку контуру  $d\Phi$  лише у випадку, коли вона тотожно дорівнює швидкості перетинання провідником магнітних силових ліній.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики: Навчальний посібник: у 2 кн. Кн. 1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – К.: Либідь, 2001. – 448 с.

2. Вольдек А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.
3. Гончаренко С.У. Фізика: Довідкові матеріали для абітурієнтів. – К.: Либідь, 1996. – 208 с.
4. Дмитрієва В.Ф. Фізика: Навчальний посібник. – К.: Техніка, 2008. – 648 с.
5. Зачек І.Р., Кравчук І.М., Романішин Б.М. Курс фізики: Навчальний підручник. – Львів: Вид-во "Бескид Біт", 2002. – 376 с.
6. Крыжановский В.Г. Физика. Справочник школьника и студента. – Донецк: ООО ПКФ "БАО", 2008. – 464 с.
7. Кутковецкий В.Я., Запорожец Ю.М. Взаимодействие проводника с магнитным полем // Электричество. – 1996. – №9. – С. 60-62.
8. Кутковецкий В.Я. Закон електромагнітної індукції // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – №4. – С. 34-39.
9. Лившиц А.Л. Униполярный генератор постоянного тока. Авт. свидетельство СССР №104347, класс 21 d, 6 49m от 28.11.1951. – 3 с.
10. Миткевич В.Ф. Магнитный поток и его преобразования. – М.-Л.: Изд. АН СССР, 1946. – 258 с.
11. Парсел Э. Электричество и магнетизм. – М.: Наука, 1975. – 440 с.

#### REFERENCES

1. Bushok G.F., Levandovskiy V.V., Piven G.F. *Kurs fiziki: Navchalniy posibnik: u 2 kn. Kn. 1. Fizichni osnovi mehaniki. Electrica i magnetism* [Physics course: Tutorial: in 2 vols. Vol.1. Physical principles of mechanics. Electricity and Magnetism]. Kyiv, Libid Publ., 2001. 448 p. (Ukr).
2. Vol'dek A.I., Popov V.V. *Elektricheskie mashiny. Vvedenie v elektromekhaniku. Mashiny postoyannogo toka i transformatory* [Electrical machines. Introduction into electrical engineering. DC machines and transformers]. St.Petersburg, Piter Publ., 2008. 320 p. (Rus).
3. Goncharenko S.U. *Fizika: Dovidkovi materiali dlya abiturientiv* [Physics: Reference materials for entrants]. Kyiv, Libid Publ., 1996. 208 p. (Ukr).
4. Dmitrieva V.F. *Fizyka: Navchal'nyy posibnyk* [Physics: Tutorial]. Kyiv, Tehnika Publ., 2008. 648 p. (Ukr).

5. Zachek I.P., Kravchuk I.M., Romanishin B.M. *Kurs fiziki: navchalniy pidruchnik* [Physics course: Training Tutorial]. Lviv, Beskid Bit Publ., 2002. 376 p. (Ukr).
6. Krijanovskiy V.G. *Fizika. Spravochnik shkolnika i studenta* [Physics. Directory of pupils and students]. Donetsk, PKF "BAO" Ltd., 2008. 464 p. (Rus).
7. Kutkovetskiy V.J., Zaporozec Y.M. The interaction of conductor with a magnetic field. *Elektrichestvo – Electricity*, 1996, no.9, pp. 60-62. (Rus).
8. Kutkovetskiy V.J. The law of electromagnetic induction. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.4, pp. 34-39. (Ukr).
9. Livshiz A.L. *Unipolarniy generator postoyannogo toka* [Unipolar DC generator]. Patent USSR, no.104347, 1951, 3 p.
10. Mitkevich V.F. *Magnitniy potok i ego preobrazovaniya* [Magnetic flux and its conversion]. Moscow-Leningrad, Acad. of Sci. USSR Publ., 1946. 258 p. (Rus).
11. Parcel E. *Elektrichestvo i magnetizm* [Electricity and Magnetism]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 440 p. (Rus).

Надійшла (received) 25.09.2014

Кутковецкий Валентин Якович, д.т.н., проф.,  
Чорноморський державний університет ім. Петра Могили,  
54003, Миколаїв, вул. 68 Десантників, 10,  
тел/phone +38 0512 366578, e-mail: kb@kma.mk.ua

V.J. Kutkovetskiy

Petro Mohyla Black Sea State University,  
10, 68-Desantnykiv Street, Mykolaiv, 54003, Ukraine.

#### Physic basis of electromagnetic induction law.

The statement on the macro level of EMF dependence on change in magnetic flux in time wrong reflects the physical phenomenon of electromagnetic induction law by Faraday, because EMF can be induced if the magnetic flux of the circuit does not change. Changing magnetic flux of the circuit when the electromotive force arises is only a result of crossing the magnetic field lines by conductor and is an exception, which applies only to certain classes of electric machines. References 11, figures 11.

Key words: **electromagnetic induction law, Faraday, Maxwell, phenomenon.**